

РАЗРАБОТКА ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ УСТАНОВКИ НА ОСНОВЕ ОПТИЧЕСКОГО СПЕКТРОГРАФА С ОТРАЖАЮЩЕЙ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКОЙ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ СПЕКТРА ОПТИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

Цепляева А.В.

Уральский технический институт связи и информатики (филиал) Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики», Екатеринбург, Россия (620109 Россия, г. Екатеринбург, ул. Репина, 15).

Аннотация: Настоящая статья посвящена разработке исследовательской установки на основе оптического спектрографа с отражающей дифракционной решеткой для изучения спектра оптических источников излучения. В процессе выполнения проекта была разработана оптическая схема линзового спектрографа на основе дифракционной решетки. Примененная оптическая схема состоит из двух объективов, основная задача которых коллимировать световой поток от оптической щели на диспергирующем элементе, а также фокусировка диспергированного светового потока на светочувствительном элементе. В качестве такого элемента применена КМОП матрица фотоаппарата Nikon D5000 со стандартным объективом 55 мм. С помощью созданного прибора получены и исследованы спектры первого и второго порядка следующих источников излучения: светоизлучающий диод видимого диапазона, люминесцентная лампа. Обработка результатов проводилась с помощью свободно распространяемого П.О. Cell Phone Spectrometer. Результаты исследования спектров данных источников совпадают с теоретическими, а также с техническими характеристиками источников, что свидетельствует о работоспособности разработанной установки.

Ключевые слова: спектрограф, дифракционная решетка, спектр.

DEVELOPMENT RESEARCH FACILITY BASED ON OPTICAL SPECTROGRAPH WITH A REFLECTIVE DIFFRACTION GRATING TO STUDY THE SPECTRUM OF THE OPTICAL SOURCE RADIATION

Tseplyaeva A.V.

Ural Institute of Communications and Informatics (branch) Federal State Institution of Higher Education "Siberian State University of Telecommunications and Informatics", Ekaterinburg, Russia (620 109 Russia, Ekaterinburg, street Repin, 15).

Abstract: This article is dedicated to developing research facility on the basis of an optical spectrograph with a reflective diffraction grating for the study of the spectrum of optical radiation sources. During implementation of the project was designed optical scheme spectrograph lens diffraction grating. The use of optical system consists of two lenses, the main task of which be collimated light stream by the optical gap on dispersing element and focusing the dispersed light stream on a photosensitive member. As such an element employed CMOS matrix camera Nikon D5000 with a standard 55 mm lens. Established using the created device are received and investigated the spectra of first and second order following light sources: a light emitting diode in the visible range, the fluorescent lamp. Processing of the results was performed using

freeware P.O. Cell Phone Spectrometer. Results of the research of the spectra given sources agreement with the theoretical and the technical characteristics of sources, indicating that the of working capacity developed by the setting.

Key words: spectrograph, the diffraction grating, spectrum.

Введение

В настоящее время оптическая связь является перспективным направлением отрасли связи, поскольку в качестве носителя информационного сигнала используется электромагнитное излучение оптического (ближнего инфракрасного) диапазона, а в качестве направляющих систем — волоконно-оптические кабели.

Благодаря высокой несущей частоте и широким возможностям мультиплексирования пропускная способность волоконно-оптических линий многократно превышает пропускную способность всех других систем связи и может измеряться терабитами в секунду. Малое затухание света в оптическом волокне позволяет применять волоконно-оптическую связь на значительных расстояниях без использования усилителей.

Основными элементами в схемах ВОСП являются источники оптического излучения. Одной из основных характеристик источников является спектр их излучения, поэтому его наблюдение в процессе изучения материалов позволит повысить наглядность изучаемого материала и в целом повысить качество подготовки выпускников инфокоммуникационной отрасли, формирование их профессиональных компетенций.

Цель исследования

Целью работы является создание исследовательской установки на основе оптического спектрографа для исследования спектрального состава источников излучения, применяемых в волоконно-оптических системах передачи, атмосферных оптических линиях связи.

На первоначальном этапе была поставлена задача разработать оптическую схему спектрографа на основе дифракционной решетки и реализовать её в виде действующего прототипа. В качестве подтверждения работоспособности прототипа необходимо получить фотографии спектра источников излучения видимого диапазона на примере люминесцентных ламп и светоизлучающих диодов.

Теория спектроскопии

Спектроскопия основывается на явлении дисперсии света. Дисперсией света называют явление, обусловленное зависимостью абсолютного показателя преломления вещества от частоты света или зависимостью фазовой скорости света в веществе от длины волны [1].

Один из самых наглядных примеров дисперсии — разложение белого света при прохождении его через призму (опыт Ньютона). Причиной дисперсии является неодинаковая скорость распространения лучей света с различной длиной волны в оптической среде. Чем больше частота волны, тем больше показатель преломления и меньше ее скорость света в среде [2].

Для повышения разрешающей способности приборов в спектроскопии применяется щель. Размер дифракционной картины зависит от ширины щели, чем она меньше, тем больше размер картины, следовательно, и разрешающая способность выше.

В спектроскопии для получения спектра используют призму или дифракционную решетку. Прибор для наблюдения спектра называется спектроскоп. Дисперсия света на призме описывается опытом Ньютона. Когда луч белого света достигает стенки призмы, он преломляется на границе двух сред воздуха и стекла, и раскладывается на составляющие цвета. Поскольку лучи каждого цвета преломляются под разными углами при попадании в призму и на выходе из нее, то разница между углами преломления становится больше. Так происходит дисперсия света [5].

С развитием технологий появились дифракционные решетки (ДР) – оптический прибор, позволяющий получать разложение света на спектральные составляющие. Решетка представляет собой совокупность большого числа регулярно расположенных штрихов (щелей, выступов), нанесённых на некоторую поверхность. Дифракционные решетки бывают отражательными и прозрачными, в зависимости от того как ведется наблюдение, в отраженном свете или в проходящем.

Дисперсия света на решетке происходит несколько иначе, чем на призме. Фронт световой волны разбивается штрихами решетки на отдельные пучки когерентного света. Эти пучки претерпевают дифракцию на штрихах и интерферируют друг с другом. Так как для разных длин волн максимумы интерференции оказываются под разными углами (определяемыми разностью хода интерферирующих лучей), то белый свет раскладывается в спектр [3].

Величина дисперсии зависит от количества штрихов, нанесенных в мм поверхности решетки. В основном этот параметр называют плотностью решетки или частотой (периодом). От частоты решетки зависит рабочий диапазон спектрометра и спектральное разрешение. Диапазон длин волн спектроскопа обратно пропорционален дисперсии решетки благодаря фиксированной геометрии. Чем шире дисперсия, тем выше разрешение спектроскопа. И, наоборот, более низкая частота решетки приводит к падению дисперсии и увеличению диапазона длин волн в ущерб его спектральному разрешению.

Существенное отличие спектра на призме от спектра на дифракционной решетке состоит в нелинейности первого: угол отклонения призмой лучей монохроматического света не пропорционален ни длине волны этого света, ни его частоте. Также спектр сжат в красной области и растянут в фиолетовой. Помимо этого, применяемые в настоящее время стекла для изготовления призм, как правило, имеют значительный коэффициент поглощения в ближнем инфракрасном диапазоне, что не позволяет их использовать для наблюдения спектра источников, применяемых в волоконно-оптических системах, так как данные источники работают в диапазоне 1300–1600 нм.

Недостатки диспергирующей системы на основе призмы, является причиной выбора, в качестве данной системы, дифракционной решетки. Еще одним недостатком призмы является то, что в отличие от дифракционной решетки она дает всего один порядок спектра.

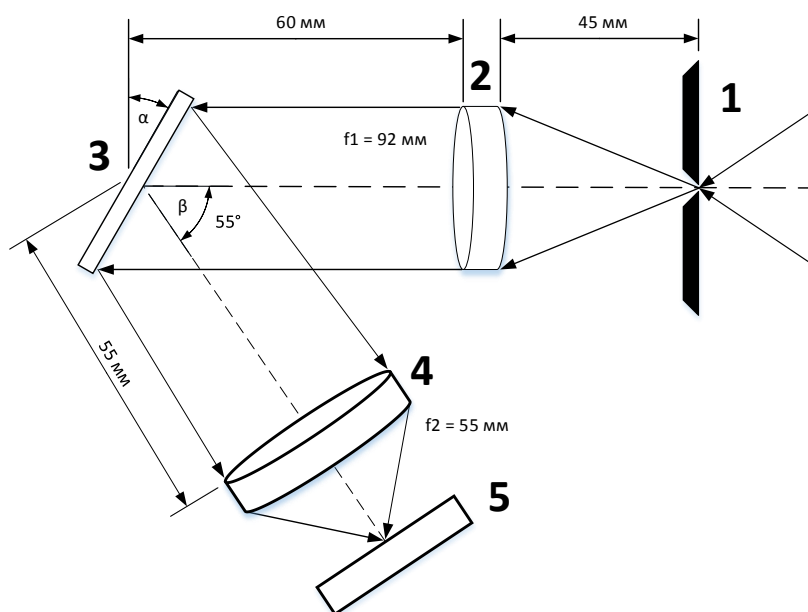
Выбор оптической схемы спектрографа

В настоящее время для анализа спектра оптического излучения наибольшее применение нашли спектрографы – приборы, позволяющие получать фотографическое изображение исследуемого спектра.

Для разработки спектрографа необходимо было определить оптическую схему, по которой будет строиться прибор. Изучив литературу по данной теме и просмотрев оптические схемы промышленных спектрографов можно сделать вывод, что они отличаются лишь количеством объективов и зеркал, а также их расположением в схеме. Обязательно в схеме должны присутствовать такие элементы как щель, коллиматор.

Экспериментальным путем определился самый оптимальный вариант схемы с двумя объективами. В проектируемом спектрографе будет использоваться эта схема, но в зеркальном отражении. Также в ходе эксперимента определились расстояния, на которых располагаются элементы в схеме относительно друг друга.

Оптическая схема разрабатываемого спектрографа с указанием всех расстояний между элементами представлена на рисунке 1.



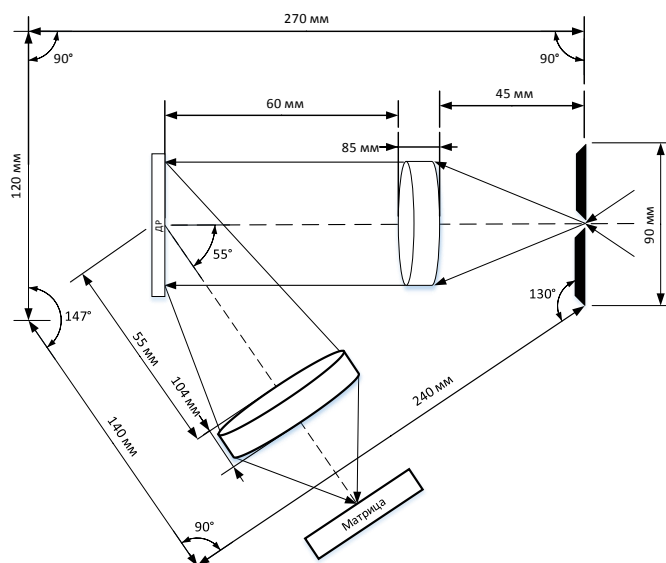
1 – щель; 2 – объектив коллиматора (длиннофокусный); 3 – дифракционная решетка; 4 - объектив (короткофокусный); 5 – ПЗС матрица

Рисунок 1 – Оптическая схема разрабатываемого спектрографа

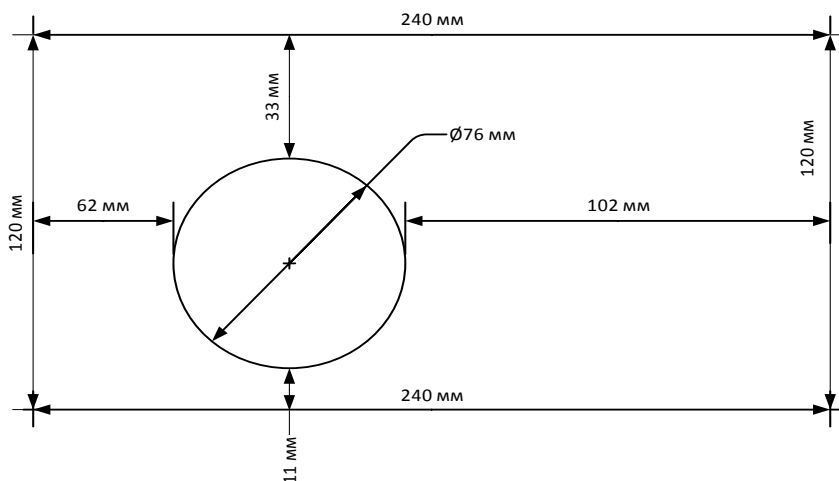
Значение угла α не фиксировано, так как дифракционная решетка образует несколько порядков спектра и для просмотра определенного порядка необходимо изменять угол наблюдения. Основным будет являться второй порядок спектра, при этом достигается приемлемая разрешающая способность и минимальное перекрытие в длинноволновом диапазоне с третьим спектральным порядком. Угол между осями объективов β определен конструктивными особенностями в ходе эксперимента.

Поскольку щель (1) находится в фокусе коллиматора (2), то исследуемое световое излучение после прохождения через щель и коллимирующий объектив падает на

После определения оптической схемы спектрографа необходимо было сделать корпус для всей конструкции. Конструктивные особенности спектрографа обуславливают оптическая схема и зеркальный фотоаппарат NikonD5000, поскольку он выступает в качестве объектива и ПЗС матрицы. Схема конструкции спектрографа (вид сверху) представлена на рисунке 2.



Как видно из рисунка 2 фотоаппарат полностью не помещается в корпусе, а лишь только объектив. Поэтому необходимо было сделать отверстие в стенке корпуса для вставки объектива. Вид стенки корпуса со стороны фотоаппарата представлен на рисунке 3.



116

Стенки корпуса выполнены из фанерной доски толщиной 10 мм. После сборки корпус был покрашен в черный цвет для предотвращения отражений света от стенок внутри конструкции.

Внешний вид конструкции спектрографа представлен на рисунке 4.



Рисунок 4 – Внешний вид конструкции спектрографа

В разработанном спектрографе используется щель (1), изготовленная из двух лезвий из нержавеющей стали. Ширина щели составила 125 мкм. Данное расстояние в процессе изготовления обеспечивалось оптическими волокнами, которые обеспечивали постоянный зазор между пластинами при изготовлении щели. Ширина щели определяет интенсивность свечения спектральных линий. Узкая щель позволяет обнаружить менее мощные спектральные составляющие, однако при этом предъявляются высокие требования к чувствительному элементу, в данном случае к ПЗС матрице.

Длиннофокусный объектив (2) предназначен для преобразования света в параллельный пучок, падающий на дифракционную решетку (3) с параметрами: размер в сантиметрах $3,61 \times 3,61$, период $d = 8300 \text{ \AA}$, количество штрихов – 1200 на мм. В качестве короткофокусного объектива и матрицы выступает зеркальный фотоаппарат Nikon D5000 (4), настроенный на фокусное расстояние 55 мм.

Для получения спектра необходимо направить излучение от источника на входную щель спектрографа и изменением угла поворота дифракционной решетки получить спектральную картину нужного порядка спектра.

Спектр первого порядка светоизлучающего диода представлен на рисунке 5.



Рисунок 5 – Непрерывный спектр СИД

Необходимо произвести анализ полученного спектра в программе CellPhoneSpectrometer.

Для анализа необходимо загрузить фотографию спектра в левую область программы (окно Sample) и произвести калибровку изображения по цветам. Затем загрузить фотографию эталонного спектра (например солнечного) в правую область программы (окно Reference)

и повторить калибровку. Далее в окне PlotTraceSelection выбрать параметр Intensity (Sample), а в окне AbscissaSelection – Wavelength (nm). Для построения графика активировать кнопку MakePlotComputeTComputeA. Таким образом, в окне программы отобразится график отношения интенсивности излучения к длине волны (рисунок 6).

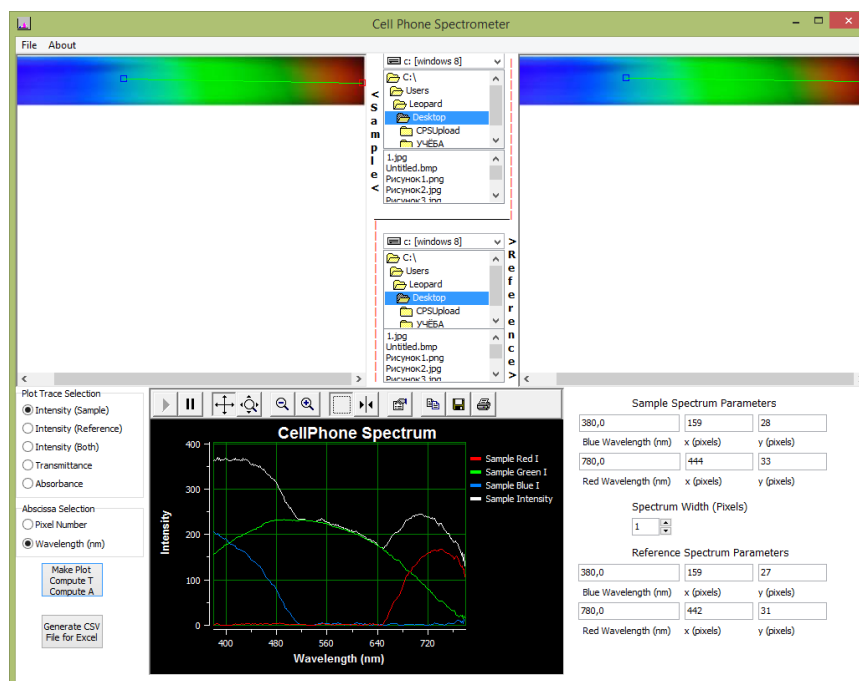


Рисунок 6 – Построение графика в программе CellPhoneSpectrometer

Анализ спектральных составляющих можно рассмотреть по графику, показанному на рисунке 7.

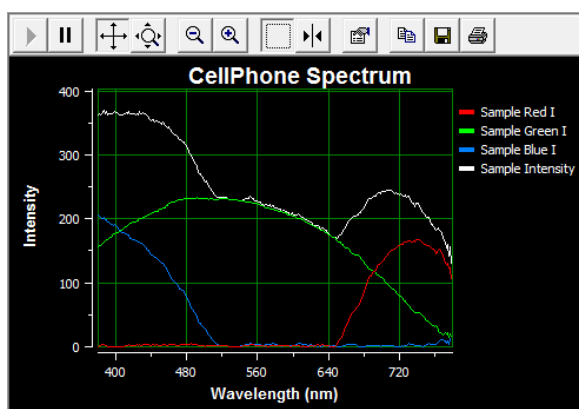


Рисунок 7 – Графический анализ спектра светоизлучающего диода

На графике отображены зоны интенсивности красного (Red), зеленого (Green) и синего (Blue) цвета. Для определения длины волны максимума излучения красного цвета необходимо определить максимальное значение на графике по оси интенсивности и спроецировать данную точку на ось длин волн (рисунок 8).

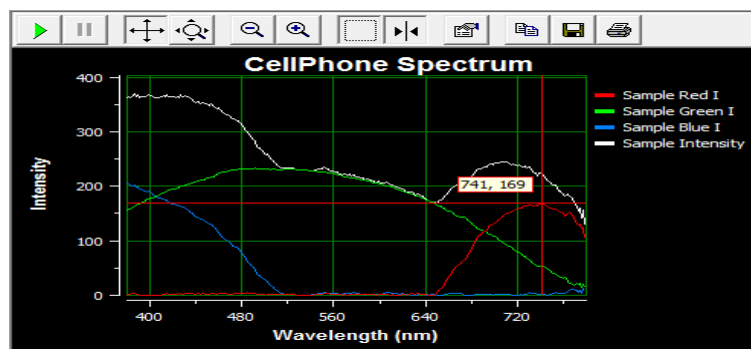


Рисунок 8 – Определение длины волны максимума красного цвета

Максимум интенсивности красного цвета пришелся на длину волны 741 нм. По аналогии определяются максимумы синего и зеленого цвета. Результат сведен в таблицу 1.

Таблица 1 – Результаты спектрального анализа

Монохроматическая составляющая спектра (цвет)	Длина волны, нм
Синий (Blue)	390
Красный (Red)	741
Зеленый (Green)	530

Спектральный анализ линейчатого спектра второго порядка люминесцентной лампы, полученного разработанным спектрографом, производится по аналогии, результаты спектрального анализа представлены в таблице 2. Спектр представлен на рисунке 9.



Рисунок 9 – Спектр второго порядка люминесцентной лампы

Таблица 2 – Результаты спектрального анализа

Монохроматическая составляющая спектра (цвет)	Длина волны, нм
Синий (Blue)	380
Красный (Red)	756
Зеленый (Green)	550

Таким образом, используя спектрограф можно изучать спектральный состав различных источников излучения.

Заключение

В ходе работы были выполнены все поставленные задачи, но цель достигнута частично, так как на данном этапе разработана аппаратная часть, но нет собственного программного обеспечения для анализа спектра. Также в качестве регистрирующего устройства сейчас применен зеркальный фотоаппарат NikonD5000, в дальнейшем планируется использовать ПЗС матрицу.

В перспективе находится развитие аппаратной части в виде узла точного позиционирования дифракционной решетки относительно коллимирующего объектива и разработка собственного П.О. Возможна доработка входного узла в виде оптического волокна в качестве входной щели.

Разработка спектрографа несет в себе большую практическую значимость, так как он будет применяться в учебном процессе для повышения качества подготовки выпускников. На основе спектрографа возможна разработки системы мониторинга атмосферы на предмет загрязненностью различными примесями и газами, так же можно применить данную установку для разработки системы перестройки рабочей длины волны источника излучения в атмосферных оптических линиях связи в зависимости от загрязненности атмосферы, чтобы подобрать наиболее оптимальное окно прозрачности в тот или иной период времени.

Список литературы

1. Ландсберг Г.С. Оптика. - М.: Наука, 1976. Гл. IX.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. - Т. IV. Оптика. - М.: Наука, 1980 – 752 с.
3. Кингсеп А.С., Локшин Г.Р., Ольхов О.А. Основы Физики. - Т. I. Механика, электричество и магнетизм, колебания и волны, волновая оптика. - М.: ФИЗ- МАТЛИТ, 2001. Ч. III
4. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высшая школа, 2003.
5. Бутиков Е.И. Оптика. Санкт-Петербург: 2003.

References

1. Landsberg G.S. Optics. - M .: Science, 1976. Ch. IX.
2. Sivyxin D.V. The general course of physics. - T. IV. Optics. - M .: Science, 1980 – 752 с.
3. Kingsep A.S., Lokshin G.R., Olxov O.A. Fundamentals of Physics. - T. I. mechanics, electricity and magnetism, oscillations and waves, wave optics. - M .: Fiz - Matlit, 2001. Part of III.
4. Trofimova T.I. The course of physics. M .: High School, 2003.
5. Bytikov E.I. Optics. St. Petersburg: 2003.